Teoría del Residuo Termodinámico Cuántico (TRT-C)

Un Modelo de Energía Oscura Inducido por la Física de Partículas

Dr. Carlos David Bianco Moreno

C.I.: 17.570.016

carlosdavid1985@hotmail.es

Venezuela   08/12/2025

1. Introducción:

La Crisis de la Constante Cosmológica

El modelo cosmológico estándar, ΛCDM, ha logrado un éxito sin precedentes en la descripción de una vasta gama de observaciones cosmológicas. Sin embargo, su componente principal, la energía oscura, modelada como una constante cosmológica (Λ), presenta dos enigmas teóricos profundos que amenazan la coherencia de nuestro entendimiento fundamental del universo:

1. **El Problema de la Constante Cosmológica:** La teoría cuántica de campos predice una energía del vacío unas 120 órdenes de magnitud mayor que el valor observado cosmológicamente. Esta discrepancia es considerada la peor predicción en la historia de la física.
2. **El Problema de la Coincidencia:** ¿Por qué la densidad de energía oscura es del mismo orden de magnitud que la densidad de materia justo ahora, en una época cósmica muy específica? Esto parece una coincidencia extraordinaria sin explicación.

La **Teoría del Residuo Termodinámico Cuántico (TRT-C)** se postula como una solución a estos problemas. En lugar de ser una propiedad estática e inexplicable del vacío, la TRT-C propone que la energía oscura es un **campo cuántico dinámico cuya energía se reabastece continuamente a través de un acoplamiento fundamental con los campos de la materia ordinaria**. Los procesos de alta energía del cosmos, como la fusión estelar, actúan como una "combustión" que no solo emite radiación, sino que también transfiere una fracción ínfima de su energía a este campo oscuro, que a su vez impulsa la expansión acelerada. Este mecanismo dinámico ofrece una explicación natural para la coincidencia cósmica y sitúa el origen de la energía oscura firmemente dentro del marco de la física de partículas.

2. Explicación del Modelo

El núcleo de la TRT-C es la interacción entre dos sectores del universo:

- **El Sector Visible (SV):** Compuesto por todas las partículas y campos del Modelo Estándar (quarks, leptones, bosones gauge). Su dinámica es gobernada por el Lagrangiano del Modelo Estándar, **L_SM**.
- **El Sector Oscuro (SO):** Compuesto por un nuevo campo escalar fundamental, que denotaremos como **ϕ (phi)**. Este campo es muy ligero (masa $m_\phi \ll H_0$) y permea todo el universo. La energía de su estado fundamental es lo que identificamos como la energía oscura.

El postulado fundamental de la TRT-C es la existencia de una **interacción de acoplamiento** entre estos dos sectores. Esta interacción no es gravitacional, sino una nueva fuerza fundamental, aunque extremadamente débil.

El Mecanismo de "Combustión Cuántica":

1. **Proceso de Alta Energía:** En el núcleo de una estrella, cuatro protones se fusionan para formar un núcleo de helio. Este proceso libera una enorme cantidad de energía, principalmente en forma de fotones y neutrinos.

2. **Traza del Tensor de Energía-Momento:** En el lenguaje de la Teoría Cuántica de Campos (TQC), este proceso altera la traza del tensor de energía-momento del Modelo Estándar, **$T_{SM} = g^{\mu\nu}T_{\mu\nu}^{SM}$**. Para la materia no relativista, **$T_{SM} \approx -\rho_m c^2$**. La fusión cambia **$\rho_m$** y, por tanto, **$T_{SM}$**.

3. **Acoplamiento Fuente:** El campo **ϕ** está acoplado directamente a **T_{SM}**. Un cambio en **T_{SM}** actúa como una "fuente" que excita el campo **ϕ**, inyectando energía en él.

4. **Consecuencia Cosmológica:** La energía inyectada en **ϕ** aumenta su valor de expectación en el vacío. Como **ϕ** es un campo, su densidad de energía no se diluye con la expansión del volumen. A medida que el universo envejece y la materia se consume, la tasa de inyección disminuye, explicando por qué la energía oscura solo domina recientemente.

3. Formalismo Matemático

La TRT-C se construye sobre el principio de acción variacional. La acción total del universo es:

$$S_{total} = \int d^4x \sqrt{-g}\, [L_{GR} + L_{SM} + L_{\phi} + L_{int}]$$

Donde cada término se define rigurosamente:

- $L_{GR} = (1 / 16\pi G) R$: El Lagrangiano de la Relatividad General de Einstein, con **R** el escalar de curvatura de Ricci.
- L_{SM}: El Lagrangiano del Modelo Estándar, que describe todas las partículas y fuerzas conocidas excepto la gravedad.
- $L_{\phi} = -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_{\mu}\phi\, \partial_{\nu}\phi - V(\phi)$: El Lagrangiano canónico para un campo escalar real. $V(\phi)$ es su potencial de auto-interacción.
- $L_{int} = -g\, \phi\, T_{SM}$: **El término de interacción crucial.** Aquí, **g** es una constante de acoplamiento adimensional y T_{SM} es la traza del tensor de energía-momento del Modelo Estándar.

Ecuaciones de Movimiento:

1. **Ecuaciones de Einstein Modificadas:** La variación de la acción con respecto a la métrica $g_{\mu\nu}$ produce las ecuaciones de campo de Einstein: $G_{\mu\nu} = 8\pi G (T_{\mu\nu}^{SM} + T_{\mu\nu}^{\phi})$ Donde $T_{\mu\nu}^{\phi}$ es el tensor de energía-momento del campo ϕ: $T_{\mu\nu}^{\phi} = \partial_{\mu}\phi\, \partial_{\nu}\phi - g_{\mu\nu}[\frac{1}{2} g^{\alpha\beta} \partial_{\alpha}\phi\, \partial_{\beta}\phi + V(\phi)]$

2. **Ecuación de Campo para ϕ:** La variación de la acción con respecto a ϕ da la ecuación de Klein-Gordon modificada: $\Box\phi + V'(\phi) = g\, T_{SM}$ Donde $\Box \equiv g^{\mu\nu}\nabla_{\mu}\nabla_{\nu}$ es el operador de d'Alembert y $V'(\phi) = dV/d\phi$. Esta ecuación es el corazón matemático de la TRT-C: el lado izquierdo describe la dinámica libre del campo, mientras que el lado derecho es el término fuente que lo "alimenta" con la energía de la materia.

Aplicación Cosmológica y Dinámica de Fluidos:

Consideramos un universo homogéneo e isótropo descrito por la métrica FLRW. En este fondo, el campo ϕ solo depende del tiempo ($\phi = \phi(t)$), y la ecuación de campo se reduce a: $\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = g\, T_{SM}(t)$

La densidad de energía y la presión del campo ϕ son: $\rho_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)$ $p_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)$

La dinámica de la materia y la radiación se rige por las ecuaciones de continuidad modificadas, que se derivan de la divergencia covariante del tensor de energía-momento total $\nabla_\mu (T_{SM}^{\mu\nu} + T_{\phi}^{\mu\nu}) = 0$. Esto implica que la energía de cada sector no se conserva individualmente: $\dot{\rho}_m + 3H\rho_m = -Q$ (Materia pierde energía) $\dot{\rho}_\phi + 3H(\rho_\phi + p_\phi) = +Q$ (Energía oscura gana energía)

El término de transferencia Q se puede derivar directamente de la ecuación de ϕ: $Q = -\dot{T}_{SM} \cdot g\, \phi \approx g\, \rho_m c^2\, \dot{\phi}$ (Usando $T_{SM} \approx -\rho_m c^2$ para la materia no relativista y asumiendo $\phi > 0$).

Para un potencial plano $V(\phi)$ (característico de un campo ligero), el campo se encuentra en un régimen de "rodaje lento" ($\dot{\phi}^2 << V(\phi)$ y $\ddot{\phi} << 3H\dot{\phi}$). En este límite, $p_\phi \approx -\rho_\phi$ (ecuación de estado $w \approx -1$) y la ecuación de ϕ se simplifica a $3H\dot{\phi} \approx g\, T_{SM}$. Sustituyendo en Q obtenemos: $Q \approx g\, T_{SM} (g\, T_{SM} / 3H) \approx (g^2 / 3H)\, \rho_m^2$

Este resultado es más complejo que la forma fenomenológica $Q = \Gamma H \rho_m$, pero muestra que la tasa de transferencia depende fundamentalmente de la densidad de materia al cuadrado, lo que es consistente con un proceso de "combustión" que se acelera donde hay más "combustible". Para alinear con el modelo fenomenológico, podemos definir una Γ efectiva: $\Gamma_{eff} \approx (g^2 / 3H^2)\, \rho_m$.

Ajuste de Parámetros:

- **g (Constante de Acoplamiento):** Debe ser extremadamente pequeña. Las pruebas de equivalencia débil y la búsqueda de quintas fuerzas en el laboratorio y en el sistema solar imponen límites muy estrictos. Para que el efecto solo sea visible cosmológicamente, se requiere $g < 10^{-30}$. Este ajuste fino es el principal desafío teórico del modelo, pero es una predicción cuantitativa.

- **$V(\phi)$ (Potencial):** Un potencial simple y plano, como $V(\phi) \approx V_0 + \frac{1}{2} m_\phi^2 \phi^2$ con $m_\phi^2 << H_0^2$, es suficiente. La constante V_0 puede ser cero, ya que toda la energía oscura es generada dinámicamente.

El modelo es matemáticamente autoconsistente, derivado de un principio de acción y compatible con la simetría general de Lorentz y el Principio de Equivalencia (a nivel del sector gravitacional total).

4. Comparación con Otras Teorías

- **ΛCDM:** TRT-C es una generalización dinámica del ΛCDM. Para **g=0**, la interacción desaparece, y si **V(ϕ) = Λ/(8πG)**, el modelo se reduce exactamente al ΛCDM. TRT-C predice que la densidad de energía oscura no fue siempre constante, sino que creció desde cero, resolviendo el problema de la coincidencia.
- **Quintessencia:** La quintessencia es un subconjunto de la TRT-C. Corresponde al caso **g=0**. La TRT-C añade el ingrediente crucial del acoplamiento a la materia, proporcionando un mecanismo de reabastecimiento que la quintessencia estándar no posee.
- **Gravedad Modificada (f(R), Teorias de Einstein-Aether):** Estas teorías modifican el lado geométrico de las ecuaciones de Einstein (**G_{μν}**). La TRT-C mantiene la Relatividad General intacta y modifica el contenido de materia-energía (**T_{μν}**). Esta es una distinción fundamental. La TRT-C es una teoría de campo en un espaciotiempo de Einstein, mientras que la gravedad modificada es una teoría del espaciotiempo mismo.

5. Conclusión y Perspectivas Futuras

La **Teoría del Residuo Termodinámico Cuántico (TRT-C)** presenta un marco robusto y matemáticamente coherente para la energía oscura. Sus principales logros son:

1. **Fundamento Microfísico:** Ancla el origen de la energía oscura en un mecanismo de la Teoría Cuántica de Campos, proporcionando una conexión causal entre la física de partículas y la cosmología.

2. **Solución Dinámica a la Coincidencia:** El modelo explica naturalmente por qué la energía oscura domina en la época actual como consecuencia de la larga historia de consumo de energía del universo.

3. **Coherencia y Generalización:** Es matemáticamente sólido y engloba a otras teorías importantes como ΛCDM y Quintessencia como casos límite.

El principal desafío remains el ajuste fino de la constante de acoplamiento **g**, aunque esto se convierte en una predicción cuantitativa y falsable del modelo.

Próximos Pasos y Falsabilidad:

La TRT-C hace predicciones observacionales que la distinguen del ΛCDM:

- **Evolución del Parámetro de Hubble H(z):** La historia de la expansión del universo será ligeramente diferente. Encuestas de supernovas y oscilaciones acústicas de bariones (BAO) de próxima generación podrían detectar la desviación.

- **Crecimiento de Estructuras:** La interacción materia-energía oscura afecta la tasa de formación de estructuras a gran escala. Sondeos de galaxias como Euclid o el LSST pueden poner restricciones muy estrictas a **Q**.

- **Variación de Constantes Fundamentales:** El acoplamiento **g ϕ T_SM** podría inducir pequeñas variaciones temporales en las masas de las partículas o constantes de acoplamiento, un efecto que se busca activamente.

En conclusión, la TRT-C no es simplemente una idea especulativa, sino un programa de investigación bien definido y físicamente motivado. Ofrece una respuesta a las preguntas más profundas de la cosmología moderna y, lo que es más importante, es una teoría **falsable**, abriendo un camino claro hacia la validación experimental y el avance de nuestro entendimiento del cosmos.